

光学学报

基于硅基超表面的高效率大角度光束偏转

陈磊, 严金华*, 郭焕祥, 张航

浙江工业大学理学院, 浙江 杭州 310023

摘要 提出一种由石英和硅纳米束构成的周期性超表面结构。利用相位分布呈周期性梯度变化的特点, 可实现垂直入射光的特定角度偏转, 偏转角度可通过改变硅纳米束宽度和周期进行调节。仿真结果表明, 当偏转角度在 $\pm 45^\circ$ 范围内, 偏转效率超过 60%, 远场发散角为 3° 左右。所提结构简单, 结合可调激光器、波分复用器组成光束扫描装置并通过改变波长可实现光束角度扫描。所提结构可应用于大角度范围的固态光束扫描。

关键词 衍射; 光束偏转; 超表面; 激光雷达

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0305001

Highly Efficient Large-Angle Beam Deflection Based on Silicon-Based Metasurface

Chen Lei, Yan Jinhua*, Guo Huanxiang, Zhang Hang

College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract A periodic metasurface structure composed of quartz and silicon nano beams was proposed. The periodic gradient change in the phase distribution can be used for obtaining a specific angle deflection of the vertically incident light, and the deflection angle can be adjusted by changing the width and period of the silicon nano beam. Simulation results show that the deflection efficiency exceeds 60%, and the far-field divergence angle reaches about 3° in the deflection angle range of $\pm 45^\circ$. The proposed structure is simple and can be combined with a tunable laser and a wavelength division multiplexer to compose a beam steering device and thus the beam angle can be tuned by changing the wavelength, which can be applied to solid-state beam scanning with large angle range.

Key words diffraction; beam deflection; metasurface; lidar

OCIS codes 050.6624; 050.1960; 160.3918; 280.3640

1 引言

光束偏转与扫描技术是激光雷达^[1]与自由空间光通信^[2]等应用中的关键技术。作为一种基于光束扫描的激光测距技术, 激光雷达的光束偏转器是其中的关键器件, 激光雷达的扫描速度与扫描范围、光束分辨率等关键参数是由光束偏转器决定的。机械旋转式光偏转器^[3]通过旋转光学器件实现光束偏转, 是目前最成熟的光束偏转技术, 这种技术的原理简单且易实现, 但在装置体积、响应速度以及装置寿

命等方面不具有竞争力。非机械式的光束偏转器主要基于电光效应^[4-5]、声光效应^[6-7]和微机电系统 (MEMS)^[8-9]等, 仍存在偏转角较小、光束发散角较大等问题。光学相控阵 (OPA) 技术通过调整光学相位形成任意光束, 相位调控的方式有液晶光学相控阵^[10-11]、光波导光学相控阵^[12-13]以及 MEMS 光学相控阵^[14-15]等。为了产生大角度偏转和窄光束, 需要大量的光学天线并且需要对光学天线的相位进行精确控制。

基于光学相控阵的光束扫描一般可分解为分

收稿日期: 2020-06-17; 修回日期: 2020-08-21; 录用日期: 2020-09-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62075197)、浙江省自然科学基金(LY21F050005)

* E-mail: jinhua@zjut.edu.cn

光、移相和输出等几个过程,光学超表面的周期结构可看作衍射晶格,通过周期性地改变光的相位、振幅等特性,实现光束偏转操控^[16]。通过改变光学超表面周期以及单元尺寸等参数可调节偏转角,通过构建具有不同偏转角的超表面阵列并结合波分复用器等结构,实现对光束的扫描。2012年, Sun等^[17]设计了由金纳米棒构成的渐变梯度超表面,实现近红外的高效异常反射,在法向入射时异常反射模式的转换效率达到80%;2013年, Wei等^[18]利用金属/电介质多层堆叠的同轴环形孔构建的相位不连续超薄平面超表面,在10 GHz频段实现效率为65%、偏转角为18°的波束偏转;2017年 Lin等^[19]利用硅超表面在可见光波段下实现了透射和反射两种工作模式的光束偏转,最高效率达80%;2019年 Aoni等^[20]用多个非晶硅纳米盘组成超级晶胞,在715 nm的工作波长下通过实验测得的透射率和偏转效率分别为83%和71%,实现的偏转角为8.4°,并且通过减小超级晶胞的长度,获得15.5°的偏转角;2019年, Kim等^[21]结合电可调二氧化钽的相调制相变超表面,通过电加热主动控制二氧化钽的有效介电常数来实现可调相位响应,最大相位偏移量为250°。

根据目前已报道的研究,高偏转效率和大偏转角度的同时实现存在一定的困难,且超表面的复杂结构对工艺要求较高。本文提出一种由石英衬底和硅纳米束构成的周期性超表面结构,其共振特性引发相位变化,使得结构表面形成了相位分布的周期性梯度变化,并使垂直入射的光产生偏转。通过改变硅纳米束宽度和周期调节光束的偏转角度,该过程对工艺要求较低,易于实现。仿真结果表明,光在小角度入射时的偏转效率可以高达80%,当入射角度在±45°范围内时,光束的偏转效率超过60%,因此光在大角度偏转情况下具有较高的偏转效率。

2 基本原理

光在介质中传播时总是沿着光程最短的路径传播,这就是费马原理。对于由两种介质构成的光学界面,平面波从A点以入射角 θ_i 入射,并经过界面上B点,若平面波沿界面方向的相位不连续,则A、B两点之间存在两条无限接近的光传播路径,它们之间的相位差为零,即

$$\begin{aligned} & [k_0 n_i \sin \theta_i dx + (\Phi + d\Phi)] - \\ & (k_0 n_t \sin \theta_t dx + \Phi) = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: θ_t 是折射角; Φ 和 $\Phi + d\Phi$ 是两条路径中的光

分别穿过界面时的相位; dx 是两条路径在界面处的距离; n_i 和 n_t 是两个介质的折射率; $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 是波长。整理(1)式可得

$$\sin \theta_t n_t - \sin \theta_i n_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx}. \quad (2)$$

在入射角不变的情况下,改变界面的相位梯度 $d\Phi/dx$,则折射角 θ_t 随之改变,这就是广义折射定律(图1)^[16]。

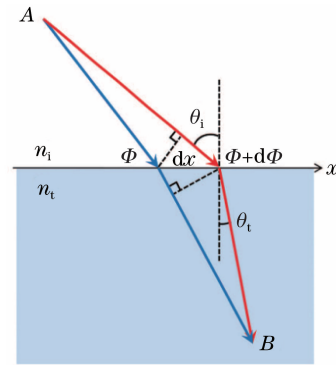


图1 广义折射定律推导示意图^[16]

Fig. 1 Schematic diagram of derivation of generalized law of refraction^[16]

界面处的相位不连续通过构造光学超表面结构来实现,超表面是一种人工结构,可根据需要进行设计以得到任意的介电常数和磁导率。本文采用一种高对比度介质型超表面,在低折射率介质基础上构建高折射率介质材料的微结构,每个结构就是一个低品质因子的共振结构。光波经过微结构所产生的相位累积可近似表示为

$$\Delta\Phi = 2\pi n_{\text{eff}} h / \lambda_0, \quad (3)$$

式中: n_{eff} 、 h 、 λ_0 分别是微结构的有效折射率、微结构高度和工作波长。一般地,为了工艺制备的方便,微结构的高度是固定的,通过改变微结构的有效折射率来调控电磁波的相位,而微结构的有效折射率可以通过调控微结构的形状和尺寸实现。利用时域有限差分算法可得到垂直入射时光束透过超表面结构所产生的相位延迟,该相位延迟使得界面的相位呈现梯度变化,从而改变光的透射方向,据此可设计透射式超表面结构,以实现垂直入射时光束偏转。

3 仿真结果

3.1 单周期实现偏转

在垂直入射的情况下实现光透射角度的偏转的根本在于界面上的合适的相位梯度,为此构建了如图2(a)所示的超表面共振单元结构,其2D截面图如图2(b)所示。该结构由石英衬底和硅纳米束构

成,光经该结构的透射时,因共振特性引发相位改变,相位改变程度与硅纳米束的结构尺寸有关,如图 2(c)所示,因此可通过改变微结构的尺寸获得所需要的相位。

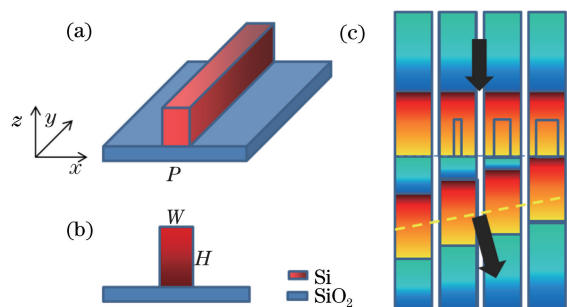


图 2 超表面共振单元结构和相位图。(a)超表面共振单元结构;(b) 2D 截面图;(c) 相位分布
Fig. 2 Structural diagrams and phase of metasurface resonance cell. (a) Structure of metasurface resonance cell; (b) 2D cross section; (c) phase distribution

硅纳米束宽和高分别为 W 和 H , 单元宽度即石英单元宽度为 P 。改变纳米束的宽度和高度都会改变超表面单元的相位延迟, 并且高度一般保持相同。考虑工艺制备, 在相位变化覆盖 2π 范围、宽度 W 处于合适的范围内时选择高度 H 。图 3 为固定 H 为 800 nm 时、不同 P 条件下, 采用时域有限差分算法得到的相位延迟与硅纳米束宽度 W 的变化曲线, 光源波长为 1550 nm 的平面波, 环境折射率为 1。随着宽度 W 的增大, 该超表面结构单元的相位延迟呈现单调增长, 且单个超表面单元的相位调节范围可完整地覆盖 2π 的范围。因此, 可通过该单元的分布实现透射光相位的梯度变化, 从而通过调控相位梯度实现垂直入射光的不同角度的偏转。

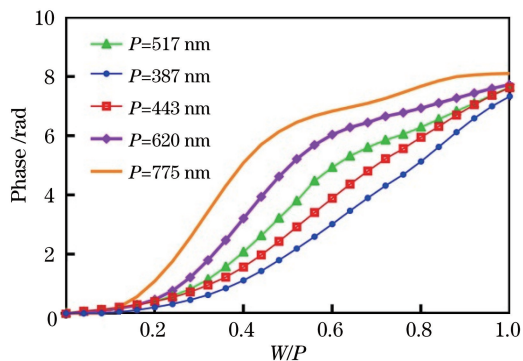


图 3 硅纳米束的相位延迟曲线
Fig. 3 Phase delay curve of silicon nano-beam

梯度超表面结构如图 4 所示, 该结构由 n 个宽度为 P 的单元组成, 它们的相位延迟呈梯度排列,

且首尾两个结构的相位相差 2π , 梯度超表面的尺寸为 $d(d=n \times P)$, 则相位梯度为 $2\pi/(n \times P)$ 。以该结构对 1550 nm 波长的光的 30° 偏转为例, 该结构为一个由 6 个单元组成的超表面结构, 单元宽度 $P=d/n=517$ nm, 每个单元的宽度 W 根据图 3 中 $P=517$ nm 的相位曲线并按照相位间隔 $2\pi/5$ 去取值, 这里纳米束宽度 W 分别为 100, 194, 238, 279, 336, 409 nm。需要说明的是, 这组宽度 W 的取值并不唯一。图 5(a) 为对该梯度超表面结构进行仿真得到的相位分布情况, 相位梯度的存在使得透射光的相位分布发生倾斜, 从而使得透射光束发生了偏转; 图 5(b) 显示透射光的偏转效率, 其中心偏转角度约为 30° , 与设计相符合, 并且偏转效率达到了 0.71。

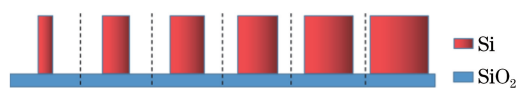


图 4 梯度超表面结构示意图
Fig. 4 Structural diagram of gradient metasurface

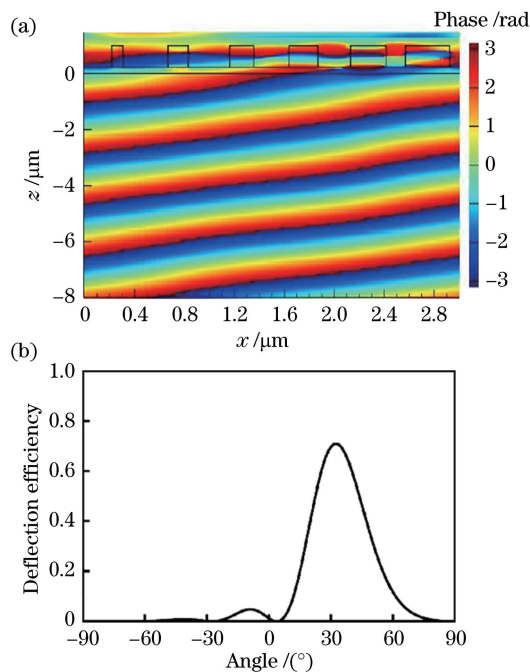


图 5 仿真得到的平面光经过梯度超表面结构后的相位分布和偏转效率。(a) 相位分布;(b) 偏转效率
Fig. 5 Simulated phase distribution and deflection efficiency of plane-wave passing through gradient metasurface. (a) Distribution of phase; (b) deflection efficiency

光束偏转是由相位梯度引起的, 为得到准连续的相位梯度, 需要尽可能多的单元数 n 。然而, 从制备工艺上来看, 单元数 n 的减少会降低工艺复杂

度,为此分析了单元数 n 对超表面偏转的影响。图 6 为 30° 偏转时,不同单元数 n 情况下的远场分布情况,可以看出单元数 n 小于 5 时,相位连续性被破坏,导致透射峰偏离了设计要求,这对单元数 n 的取值下限提出了要求;当单元数 n 大于 6 时,在保证偏转角度符合设计要求的同时,其偏转效率的改变有限。因此,为了保证偏转角度和偏转效率达到设计要求,单元数 n 应大于下限值。

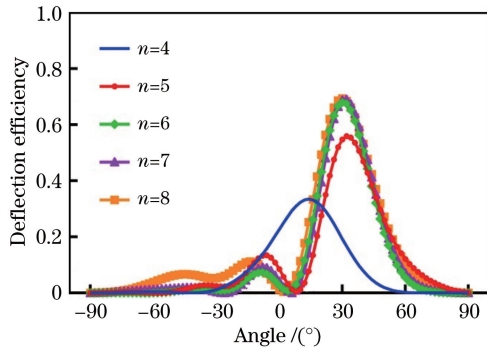


图 6 不同单元数 n 时的远场分布(以偏转角 30° 为例)
Fig. 6 Far-field distribution for different cell numbers n (take deflection angle of 30° as an example)

图 7 是光垂直入射、超表面相位差为 2π 时,透射光偏转角与梯度超表面尺寸 d 的关系,偏转角随着 d 的减小而变大。因此,可根据需要设计偏转角度,得到梯度超表面尺寸 d ,并确定所需的单元数 n 和单元宽度 P ,再根据不同硅单元宽度 P 情况下的相位延迟曲线,选择合适的相位分布时的纳米束宽度 W ,从而得到对应所需偏转角度的梯度超表面结构参数。

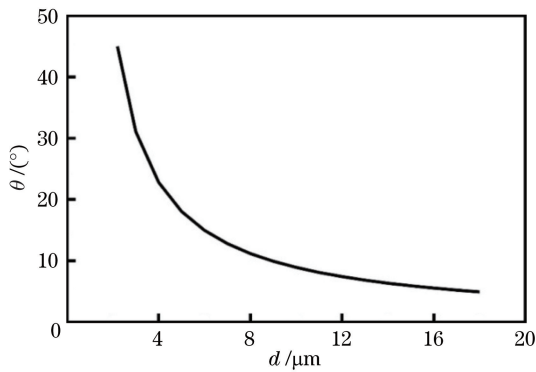


图 7 垂直入射时偏转角 θ 与尺寸 d 的关系
Fig. 7 Relationship between deflection angle θ and size d for normal incident light

3.2 利用周期性结构改变发散角

尽管单个梯度超表面结构可在大角度范围内实现光束偏转,但得到的远场分布较分散,通过梯度超表面结构的周期性排列可减小远场的发散角。周期

排列的梯度超表面结构实质上类似于光栅,以梯度超表面宽度 d 为周期。当光垂直入射至周期梯度超表面上时,产生的偏转角即为光栅的衍射角。图 8 是偏转角为 30° 时,在不同梯度超表面的周期数 N 条件下的远场透射曲线,周期数的增加显著减小了光束的远场发散角,远场发散角从单个周期时的 30.5° 降低至周期数为 9 时的 2.9° 。

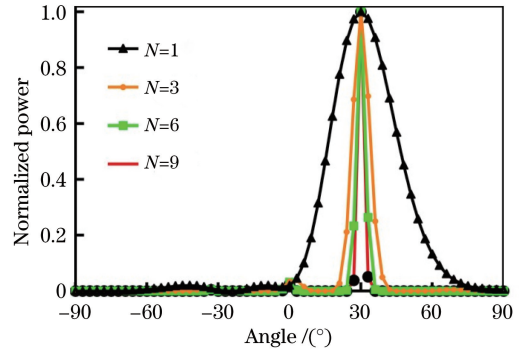


图 8 周期数 N 对远场发散角的影响(以偏转角 30° 为例)
Fig. 8 Effect of number of period on far-field divergence angle (take deflection angle of 30° as an example)

通过改变梯度超表面的相位梯度及周期 d 实现不同的角度偏转,在 $\pm 45^\circ$ 范围内不同偏转角的远场分布如图 9 所示。随着偏转角度的增大,虽然偏转效率有一定程度的下降,但当入射角度在 $\pm 45^\circ$ 范围内时偏转效率超过 0.6。远场发散角与偏转角的变化关系如图 10 所示,通过对梯度超表面周期结构进行优化,使得不同偏转角度时的远场发散角保持较好的均一性,均保持在 3° 左右。

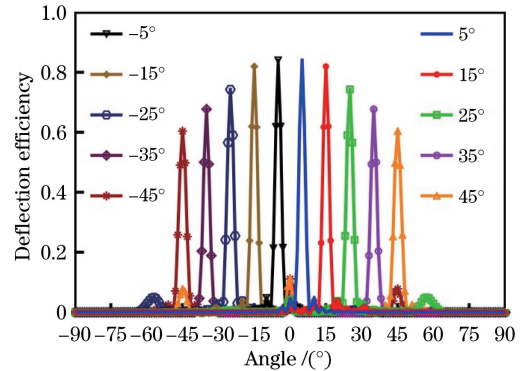


图 9 不同偏转角的远场分布
Fig. 9 Far-field distribution for different deflection angles

从制作实现角度对梯度超表面的结构参数 W 、 H 、 P 的误差进行分析。单元宽度 P 实际是衬底的宽度, P 的误差体现为硅纳米束的定位误差,实际工艺对纳米束的定位是比较精准的,因此 P 的误差可以忽略不计。而由于工艺的限制,实际制作的结构的 W 和 H 会与理论值有差异,且结构尺寸越小

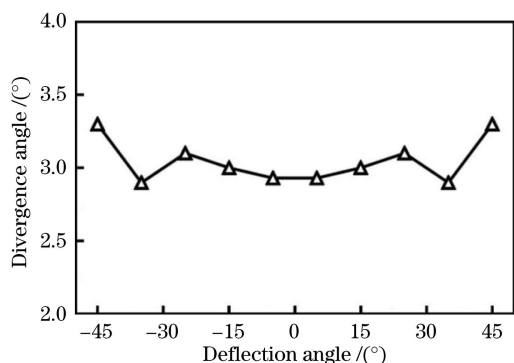


图 10 不同偏转角下的远场发散角

Fig. 10 Far-field divergence angle for different deflection angles

偏差越大。图 11 给出了当 W 和 H 与标准值相差 3% 时二者对此超表面结构的偏转效果的影响。 W 和 H 的相关偏差会对偏转效率造成较小的影响,而对偏转角度没有产生任何影响。总的来说,由制作工艺造成的误差对该梯度超表面结构的影响是有限的。

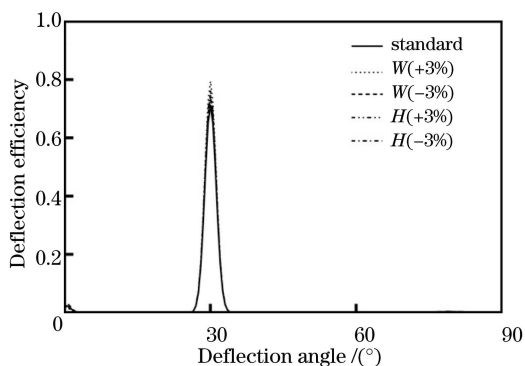


图 11 W 、 H 的相关偏差对偏转效果的影响

Fig. 11 Influence of relative deviation of W and H on deflection effect

3.3 入射光发散角及波长对光束偏转效果的影响

图 12 为不同发散角(0° 、 3° 、 6°)的垂直入射光下的光束偏转情况,从图中可以看出三种情况下的曲线高度重合,说明入射光的发散角对透射光的偏转效果影响很小,不会改变偏转光束的发散特性。通过仿真证明该梯度超表面结构不仅只适用于垂直入射的平面波,对于小角度发散的垂直入射光依然适用。

图 13 显示在相同的结构参数下,不同波长的平面入射波下的光束偏转情况。仿真结果显示,波长在 1530~1560 nm 范围内变化时,不同波长的入射光对偏转光束造成的影响较小。根据采用单一波长实现角度偏转的方法,可通过改变超表面结构来实现不同波长的平面波所需的角度的偏转,结合波分复用器件并通过改变波长可实现光束角度扫描。

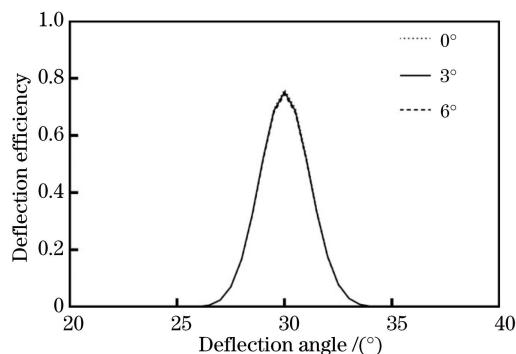


图 12 入射光的发散角对偏转光发散角的影响

Fig. 12 Influence of divergence angle of incident light on divergence angle of deflected light

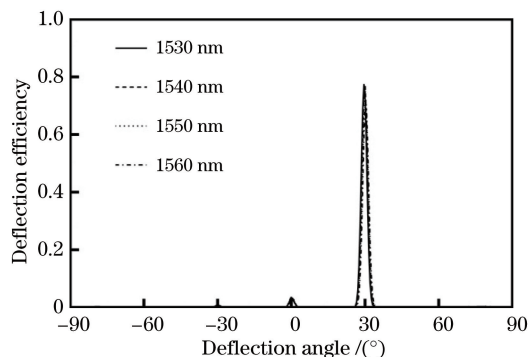


图 13 不同波长对光束偏转的影响

Fig. 13 Influences of different wavelengths on beam deflection

3.4 光束扫描的应用

光束偏转对于光束扫描的诸多应用至关重要,激光雷达、激光通信等都需要使用激光对特定探测空间进行有效的扫描。集成化程度高、扫描角度大、光束方向控制精准等都是目前激光光束扫描技术的研究热点。本文将基于上述的硅基超表面偏转器的研究,将其与波分解复用器件结合,通过改变波长实现角度扫描,结构原理图如图 14 所示。将超表面结构器件与波分解复用器件(如阵列波导光栅)输出端贴合封装,每一个波分解复用器件的输出端口对应一个超表面结构(不同超表面结构具有不同的偏转特性),当对波分解复用器件的输入端的波长进行扫

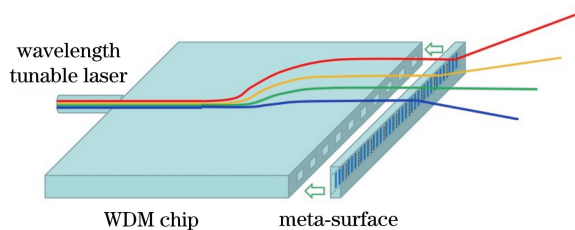


图 14 角度扫描的原理图

Fig. 14 Schematic diagram of angle scanning

描时,光束会依次通过不同的输出端口,从而实现角度扫描。

4 结 论

设计了一种能够控制光束偏转的周期梯度超表面结构,由共振特性引发的相位周期性的梯度变化会使垂直入射光产生偏转,通过改变结构宽度和周期实现偏转调控。FDTD 仿真结果表明,当入射角度在 $\pm 45^\circ$ 范围内时,所设计结构可实现 3° 左右的远场发散角、超过 0.6 的偏转效率的光束偏转。该结构实现方式简单,易于与波分复用光学芯片集成,可结合可调谐激光器、波分复用器组成光束扫描装置。利用该结构并通过改变波长,可实现对光束角度的扫描。所设计结构为大角度范围、低成本、易集成的固态光束扫描技术提供了一种可能方案。

参 考 文 献

- [1] He Z Y, Huang Y, Zhang Y Y, et al. Range-gated imaging LiDAR by scanning reception of space light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1201001.
何志毅, 黄裕, 张雨益, 等. 空间光调制器扫描接收的距离选通成像激光雷达[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1201001.
- [2] Wang Y T, Yang S H, Li Z, et al. Design of compound free space optical/millimeter wave antenna for communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1206001.
王一婷, 杨苏辉, 李卓, 等. 用于通信的自由空间光/毫米波复合天线设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1206001.
- [3] Mukhtar A, Xia L K, Tang T B. Vehicle detection techniques for collision avoidance systems: a review [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(5): 2318-2338.
- [4] Imai T, Ueno M, Sasaki Y, et al. Analyses of optical rays in KTN optical beam deflectors for device design [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(25): 7277-7285.
- [5] Zhu W, Chao J H, Chen C J, et al. Three order increase in scanning speed of space charge-controlled KTN deflector by eliminating electric field induced phase transition in nanodisordered KTN [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33143.
- [6] He N, Xie Z L. Effect of beam characteristic on detection efficiency for the coherent optical detection system based on acousto-optic deflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0206007.
- [7] Yang J, Gao Y L, Li J, et al. Studies on the wideband design of acousto-optic deflector using lithium niobate crystal [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(s2): s21601.
- [8] Qu Y, Wang C H, Pang Y J, et al. Vibration performance researching in the MEMS galvanometer of an imaging lidar system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s1): s111004.
曲杨, 王春晖, 庞亚军, 等. 成像激光雷达中的 MEMS 振镜振动特性研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(s1): s111004.
- [9] Hu Q, Pedersen C, Rodrigo P J. Eye-safe diode laser Doppler lidar with a MEMS beam-scanner [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 1934-1942.
- [10] Yan Z Q, Guo T, Wu J, et al. Laser multi-target indication technique based on liquid crystal optical phased array and volume holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0323001.
闫宗群, 国涛, 吴健, 等. 基于液晶相控阵和体全息光栅的激光多目标指示技术 [J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0323001.
- [11] Shi Y B, Ma H T, Ma Y X, et al. Numerical simulation of high accuracy and high efficiency beam steering based on liquid crystal optical phase array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0202002.
师宇斌, 马浩统, 马阎星, 等. 基于液晶相控阵高精度高效率光束偏转数值仿真 [J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0202002.
- [12] Poulton C V, Byrd M J, Raval M, et al. Large-scale silicon nitride nanophotonic phased arrays at infrared and visible wavelengths [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 21-24.
- [13] Abe H, Takeuchi M, Takeuchi G, et al. Two-dimensional beam-steering device using a doubly periodic Si photonic-crystal waveguide [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9389-9397.
- [14] Chan T K, Megens M, Yoo B W, et al. Optical beamsteering using an 8×8 MEMS phased array with closed-loop interferometric phase control [J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2807-2815.
- [15] Megens M, Yoo B W, Chan T, et al. High-contrast grating MEMS optical phase-shifters for two-dimensional free-space beam steering [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8995: 89950Q.
- [16] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.

- [17] Sun S L, Yang K Y, Wang C M, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [18] Wei Z, Cao Y, Su X, et al. Highly efficient beam steering with a transparent metasurface[J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 10739-10745.
- [19] Lin D M, Melli M, Poliakov E, et al. Optical metasurfaces for high angle steering at visible wavelengths[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 2286.
- [20] Aoni R A, Rahmani M, Xu L, et al. High-efficiency visible light manipulation using dielectric metasurfaces[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 6510.
- [21] Kim Y, Wu P C, Sokhoyan R, et al. Phase modulation with electrically tunable vanadium dioxide phase-change metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(6): 3961-3968.